

# Panorámica global de la computación óptica

## Una visión parcial

*En el presente artículo se ofrece una visión panorámica de la situación actual de la Computación Óptica, dándose unas breves ideas de algunos de los temas fundamentales que abarca. Se pone especial énfasis en el aspecto de continuidad con tecnologías ya sobradamente conocidas desde hace varias décadas y se intenta pronosticar cuál será su posible futuro en los próximos años.*

J.A. Martín-Pereda (\*) y Ana González Marcos (\*)

### Optical computing A partial view

*A general view on the present situation of the Optical Computing is presented in this paper. The main objective is to report the fundamental topics covered by this new technology. A particular emphasis is given to the connection with traditional theories known since the beginning of this century. Some ideas about its possible future complete the paper.*

## Introducción

La avalancha de sucesos que está teniendo lugar a nuestro alrededor, sin apenas dejarnos tiempo para esbozar una breve reflexión sobre qué es lo que realmente ocurre, parece como si nos forzara a mentalizarnos de que casi todo lo que surge lo hiciera de forma espontánea. Todo, en pura apariencia, nace sin antecedentes y sin etapas previas. Se configura la idea de que el pasado, de pronto, deja de tener vigencia. Es como si lo que vemos en cada momento, y las circunstancias parecen indicarlo así, sólo debiera a sí mismo su existir.

Por otra parte, el encontrarnos ante los últimos años de un siglo y, mucho más aún, de un milenio, preconditiona muchos de nuestros desarrollos.

Aparece como una obsesión de ruptura completa con normas y patrones definidos que nos llevase a una situación por completo nueva. A casi todo lo que se plantea se le añade el apelativo «nuevo» y con eso ya parece que se tranquiliza la conciencia. Son las «nuevas tecnologías», los «nuevos filósofos» o la «nueva poesía».

Pero la realidad es que ni todo lo que designamos como «nuevo» es, de hecho, nuevo, ni todo lo que se nos ofrece como surgido de la nada, carece de antecedentes. La historia de cualquier disciplina o, mejor aún, la Historia absoluta, nos enseña que apenas nada surge del vacío y que todo hecho tiene sus causas reales en sucesos ocurridos unos cuantos años atrás.

Las razones de todo lo anterior no son sino un intento de justificar el fondo del presente artículo. Artículo que quiere plantearse como una tentativa de restar sensacionalismo a un hecho que, de pronto, ha inundado todos los periódicos y las revistas del mundo: el de la presentación del «primer» ordenador óptico. A la vista de cómo ha sido presentado, parece que, de la noche a la mañana, «alguien» se hubiera despertado con una máquina óptica de calcular. Y que ese «alguien» hubiera sido el primero y el único en concebir la idea. No se indican desarrollos equivalentes en otros sitios. No se ofrecen ventajas e inconvenientes del ordenador diseñado. No se dice, para concluir, desde cuándo se está trabajando a nivel mundial en el tema. Todo parece «nuevo» y todo parece maravilloso. Pero lo que realmente parece es que, por alguna razón que está fuera de lo publicado, los entornos en los que se creó necesitasen lanzar a los medios de difusión algún desarrollo espectacular y esta vez le ha tocado al

(\*) Departamento de Tecnología Fotónica  
ETSI Telecomunicación, Madrid

ordenador óptico. Al menos, eso es lo que parece en una segunda lectura.

El objeto del presente artículo será, en consecuencia, el de ofrecer una somera panorámica de cuál es la situación actual de la Computación Óptica. Dado que, hasta la fecha, no han sido muchas las veces que este tema ha sido tratado aquí, parece procedente que se le añadan una serie de puntos que, en otras circunstancias no deberían surgir. Hablaremos así de cuáles han sido sus raíces, tanto históricas como conceptuales, de cuál es su estado hoy y, lo que es más importante, intentaremos atisbar su posible futuro. Dentro de unos años veremos lo que queda de todo ello. No se pretenderá profundizar en ninguna de las líneas que se traten. Cada una podría ser objeto de más de un artículo. Pero como aún no está demasiado claro cuál va a ser el camino final, no creemos que haya llegado ya el momento de dar protagonismo a una determinada de ellas.

## **Entorno de actuación de la computación óptica**

Antes de presentar cuál es la situación actual de la Computación Óptica parece procedente, para aquellos que aún no están muy familiarizados con el tema, hacer una breve síntesis de qué es lo que queda englobado bajo ese concepto. Y lo primero que es necesario indicar es que bajo él se presentan dos ideas en cierta forma complementarias y, en cierta manera también, contrapuestas. La primera es la que cualquier persona que oyera hablar de Computación Óptica podría imaginarse, esto es, ordenadores que hacen análogas funciones a los convencionales electrónicos, pero por métodos ópticos. Este grupo es el que designaremos como el de los «ordenadores ópticos». El otro, el menos claro, es el que podría designarse como el de los «ordenadores con componentes ópticos», o lo que es lo mismo, aquellos que para algunas de sus funciones disponen de un cierto tipo de óptica pero sin que dicha óptica llegue a realizar todo el conjunto de operaciones que son precisas en un proceso de computación. Esta idea, de hecho, ha sido ya comentado en otro artículo en esta misma revista [1]. En aquel momento se hicieron una serie de consideraciones sobre la conveniencia de uno y otro enfoque y no parece oportuno repetirlas de nuevo. Sólo conviene señalar, a modo de recordatorio, que el primer grupo pone sus objetivos en una meta única que, según algunos, está aún demasiado lejana, mientras que el segundo adopta una visión más pragmática del tema e intenta aplicar óptica donde la electrónica no puede llegar y deja a ésta las funciones en la que ya ha alcanzado una posición incontrovertible. Sobre este tema volveremos más adelante cuando hayamos visto cuál es la situación presente de todo lo desarrollado.

Una vez visto el entorno genérico de actuación de lo que hoy engloba la Computación Óptica, podemos pasar ya a estudiarlo con un poco más de detalle introduciéndonos en lo que pudiéramos denominar sus parcelas de trabajo. Y para ello, lo primero que procede es plantear el porqué de su necesidad. Y esta necesidad se deriva de la demanda, cada vez más urgente, de grandes capacidades de cálculo, de grandes intercam-

bios de datos entre unos sistemas y otros y, finalmente, de grandes almacenamientos de información. Por una parte hace falta calcular a mayor velocidad, por otra transferir los resultados de los cálculos en cantidades masivas y por otra, finalmente, almacenar más información cada vez. Y si la demanda de cálculo, por el momento está satisfecha con los presentes ordenadores, el manejo y la transferencia de los datos involucrados inicia un proceso de difícil respuesta. Las conexiones eléctricas convencionales resultan cada vez más insuficientes. Si el procesado se hizo a gran velocidad, su efectividad queda en entredicho al aparecer un verdadero cuello de botella cuando se pretende transferirlo a un lugar diferente. Y esto no se refiere sólo a transmisiones entre lugares más o menos distantes, sino que, a veces, puede ocurrir incluso en la unión entre dos chips muy próximos. Finalmente, el tercer punto señalado, el de la necesidad de memorias cada vez más densas es algo por completo reconocido y derivado, en cierta manera, de los dos anteriores.

En cada una de estas tres parcelas la óptica tiene, en principio, una solución posible que la electrónica no puede de momento dar. La segunda y la tercera son bastante claras. El almacenamiento de datos puede tener una solución posible, al menos durante un plazo razonable, mediante los métodos de almacenamiento óptico que están en la mente de todos. Los discos compactos por láser forman parte del acervo común hoy y su extensión generalizada al dominio de las memorias para ordenadores es cuestión de poco tiempo. Aunque más adelante ya no volveremos a este tema, conviene recalcar aquí la importancia considerable que tendrá esta tecnología en los futuros ordenadores, sean del tipo que sean.

El otro punto en el que tampoco merece mucho la pena detenerse es el de la transferencia de datos entre un punto y otro. La solución está ya más que demostrada y queda bajo el epígrafe de «comunicaciones ópticas». No son, evidentemente, las comunicaciones ópticas convencionales, ya que aquí los problemas que pueden presentarse son otros, pero la filosofía que las mueve es ya de sobra conocida y también ha sido tratada en estas páginas. Tampoco haremos aquí ninguna referencia a su problemática específica, dado que la filosofía que encierra se aleja bastante de nuestro actual objetivo. Existen, además, muchos artículos recientes que muestran, de forma clara, su estado actual.

El punto que resta es el que realmente constituye la aportación más diferenciadora con respecto a los planteamientos convencionales de cálculo electrónico y, en cierta manera, la que de una forma u otra contiene el concepto primario de «ordenador óptico». Es el que se refiere a la posibilidad de realizar operaciones de un tipo u otro de cálculo, mediante procedimientos ópticos. Algunos de estos métodos siguen patrones ya establecidos por los ordenadores convencionales pero otros, en cambio, se apartan drásticamente de ellos. Este entorno será el objetivo principal del presente artículo.

## **Algunas consideraciones generales**

A pesar del impresionante desarrollo de la tecnología de los ordenadores en los últimos años, uno

de los hechos más comúnmente aceptados es el de que este desarrollo no podrá mantenerse de forma indefinida. De hecho, hay quien pronostica que dentro de no más de una década los límites fundamentales impuestos por las leyes físicas, impedirán que el progreso se mantenga a la misma velocidad. En todo avance tecnológico aparecen siempre unas constricciones de carácter inexorable que impiden ir por debajo o por encima de unos determinados márgenes. Estos márgenes son los que impone la propia Naturaleza. El intentar saltárselos obliga a cambiar de superficie de movimiento y permitir la entrada en el juego de otros actores hasta entonces no considerados. Saltos de este tipo los tenemos a decenas en la historia de la Tecnología.

La situación actual de la computación es un ejemplo claro de lo anterior. Los ordenadores actuales, a pesar de sus enormes capacidades, han ofrecido ya los primeros síntomas de debilidad cuando se pretende alcanzar con ellos un progreso significativo en potencia y velocidad conjuntamente. La única solución posible, con futuro real a largo plazo, es la de adicionarles la capacidad del paralelismo. Capacidad que, al mismo tiempo, puede afectar de manera importante sobre el coste. Basados en este concepto iniciaron su entrada en escena nuevos tipos de arquitecturas de ordenadores que lo han intentado poner en acción.

Pero el concepto de paralelismo masivo es una idea relativamente nueva y en la que aún es preciso resolver un gran número de problemas para que pueda estar presente con plena efectividad. Esfuerzos dirigidos hacia ello se han iniciado en muchos países, constituyendo en muchos casos más un esfuerzo conjunto de gobiernos e industrias privadas que de iniciativas espontáneas aisladas. Las posibles soluciones adoptadas son múltiples, pero desde un punto de vista un tanto simplista pueden quedar reducidas a dos: las soluciones electrónicas y las ópticas. Las primeras presentan el hecho significativo de partir con varios cuerpos de ventaja debido a la madurez en la que se encuentra la tecnología electrónica. Las segundas, y con esto entramos ya en el eje de las presentes páginas, el de que la óptica es algo intrínsecamente paralelo; la información que nos llega visualmente lo hace en paralelo y la mayor parte de los dispositivos ópticos trabajan mejor con superficies que con puntos. Parece así que la Óptica tendría algo que decir en este terreno y hacia él se han dirigido desde hace muchos años una gran cantidad de esfuerzos que luego comentaremos.

Si lo anterior es algo claramente asentado no lo es menos otro concepto que, en principio, también parece conducir a métodos ópticos para resolver la necesidad de grandes velocidades de cálculo. En un artículo hoy ya catalogado casi como clásico en este campo [2], P. W. Smith hacía un estudio de los límites físicos que determinaban los márgenes de actuación de los posibles componentes existentes en aquel momento, año 1982. Para ello indicaba en el eje de abscisas los tiempos de conmutación posibles en los correspondientes dispositivos y en el eje de ordenadas la potencia necesaria para conmutar un bit de información. El resultado es el que se presenta en la figura 1. Como puede apreciarse, existen zonas donde la única solución es recurrir a dispositivos fotónicos, esencialmente biestables ópticos. Y esto ha dado pie, durante los últimos años, a toda una avalancha de propuestas

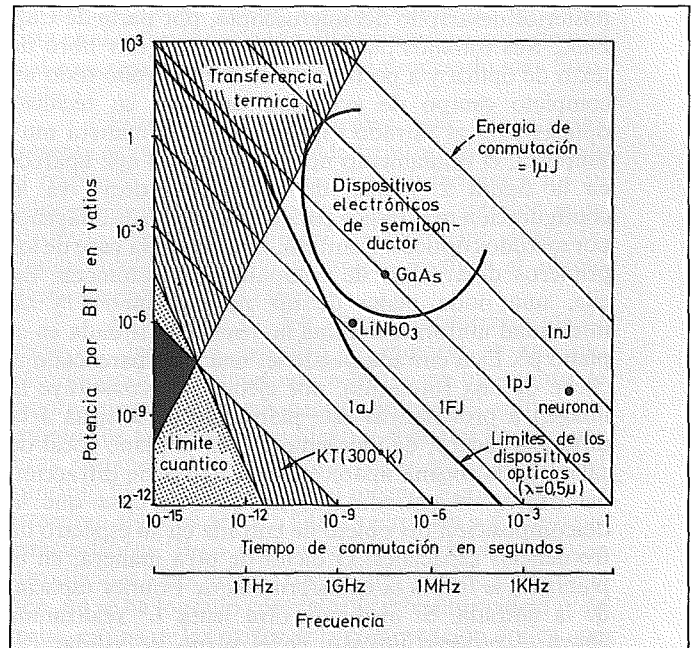


Figura 1. Limitaciones físicas de los dispositivos biestables y de conmutación.

planteando arquitecturas fotónicas de computación. Arquitecturas que, en la mayor parte de los casos, eran versiones ópticas de las electrónicas ya en uso.

Con esto en mente, podemos entrar ya en el objetivo central de este artículo. Aunque antes de hacerlo sería conveniente esbozar una ligera división en la que pueden dividirse los computadores ópticos en proyecto. Y la primera división que puede hacerse es la derivada directamente de los conceptos vertidos en el apartado anterior. Esto es, arquitecturas basadas en un procesamiento básicamente paralelo y arquitecturas basadas en un procesamiento conceptualmente serie. La filosofía de actuación de unas y otras es por completo diferente y como tal, merecen ser tratadas de forma diferenciada. Pero antes de hacerlo, y de acuerdo con lo que se indicó casi al principio de este artículo, parece obligado detenernos en lo que pudiéramos denominar...

## Prehistoria y primeros albores de la computación óptica

La base conceptual de este tipo de sistemas es tan antigua como casi la propia Óptica. Se basa esencialmente en el hecho de que cualquier imagen que se transmite lleva en paralelo una inmensa cantidad de información. Información que, desde cualquier punto de vista y especialmente desde el subjetivo, es mucho más satisfactoria cuando se recibe toda de una vez, como una imagen completa, que por otros métodos más fragmentarios o progresivos [3]. Y si esta imagen ha de ser tratada parece lógico que lo sea de la forma más inherente a ella, esto es, todo su conjunto al mismo tiempo. O dicho de otra manera, de forma paralela. La forma de trabajo para hacerlo se remonta a unas bases teóricas que llegan hasta mediados-finales del pasado siglo. En 1873, Ernst Abbe enunció una teoría de la formación de las imágenes, que sirvió de base para el

posterior desarrollo del microscopio, por parte de Carl Zeiss. Sus trabajos pueden verse en cualquier libro de texto de óptica y a partir de ellos se desarrolló todo un completo campo de actividad centrado en técnicas ópticas para el filtrado espacial. De una manera muy simplista, el fundamento no es otro que el que aparece en la figura 2 y que, de hecho, constituye ya la configuración más básica para el procesamiento de imágenes por métodos ópticos. También, a su vez, es la base de los primeros desarrollos de computadores fotónicos. En ella, una onda plana de luz monocromática y de intensidad uniforme ilumina la «entrada» situada en el plano  $P^1$ . Esta entrada puede ser una transparencia o el cliché de una fotografía, por ejemplo, y constituye la imagen a procesar. Si este plano objeto se sitúa a la distancia focal  $f$ , de una lente  $L^1$ , en el plano focal de salida de la misma aparecerá una figura de difracción del objeto de entrada que no es otra cosa que la descomposición del objeto de entrada en su espectro de frecuencias espaciales. O dicho de otra manera, en el plano  $P^2$  se forma la transformada de Fourier espacial de la entrada. Si mediante otra lente  $L^2$  realizamos ahora el proceso inverso, en el plano de salida,  $P^3$ , volveremos a obtener la imagen de entrada aunque invertida espacialmente. La teoría de todo lo anterior, o lo que es lo mismo, la posibilidad de las lentes de realizar transformadas de Fourier de imágenes, puede verse en cualquier libro elemental de óptica y constituye una de las primeras prácticas que se realizan en cualquier laboratorio.

Tomando como base lo anterior, ya puede inferirse la primera aplicación práctica de la configuración mostrada. Si en el plano  $P^2$ , en lugar de no tener ningún obstáculo que impida la posterior propagación de la luz, se dispone un determinado filtro (una rendija, un punto opaco, etc.), parte de las frecuencias espaciales del objeto de entrada serán suprimidas y, en consecuencia a la salida, en el plano imagen, nos aparecerá el objeto de partida pero habiéndosele suprimido alguna de sus características. Esto es, se habrá realizado un «filtrado» de la imagen.

La literatura de la década de los sesenta mostraba ya una pluralidad de áreas en las cuales se iniciaba la aplicación de la técnica anterior para el procesamiento óptico de datos. Así, a finales de los sesenta se habían logrado ya mejoras en las imágenes de TV y fotográficas, se había empleado en el procesamiento de señales de radar y se había usado en reconocimiento de formas. Esto es, desde hace alrededor de un cuarto de siglo, la «computación óptica» para procesamiento de

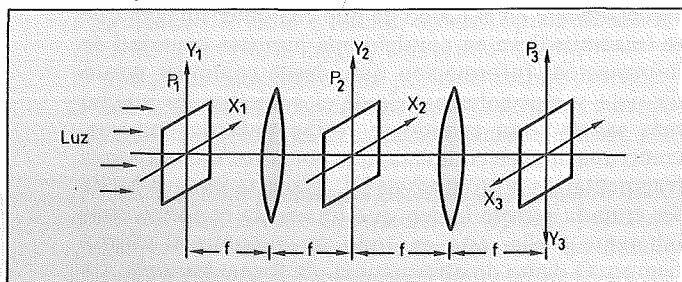


Figura 2. Esquema del procesamiento óptico de imágenes mediante la transformada espacial de Fourier.  $P^1$  constituye el plano de entrada y  $P^3$  el de salida. En  $P^2$  se situaría el filtro correspondiente al procesamiento de imagen deseado.

imágenes está andando por el terreno de la técnica. Pero algo tenía que pasar para que apenas nadie, salvo aquellos muy interesados en el tema, se hubiera percatado de su existencia. Y lo que pasaba era que no todo era tan simple como aparece en la figura 2. O, al menos, no tan cómodo para cualquier tipo de aplicación. Se habían mencionado antes las características del objeto de entrada y, como para simplificar, se había dicho que era una transparencia o un cliché fotográfico. La realidad es que con pocas cosas más se puede trabajar, en esa configuración, sin problemas. Por ejemplo, no admite posibilidad de objetos tridimensionales, no se puede trabajar en tiempo real, la iluminación tiene que ser coherente, esto es, procedente de un láser, etc. Parece mejor no seguir.

Durante un largo período de tiempo que abarcó gran parte de la década de los sesenta y casi todos los setenta, la mayor parte del camino que se fue trazando se hizo a base de los conceptos indicados anteriormente. Todas las aplicaciones prácticas presentadas se limitaron a restauración de imágenes y propuestas de un elemental método de cálculo a base de

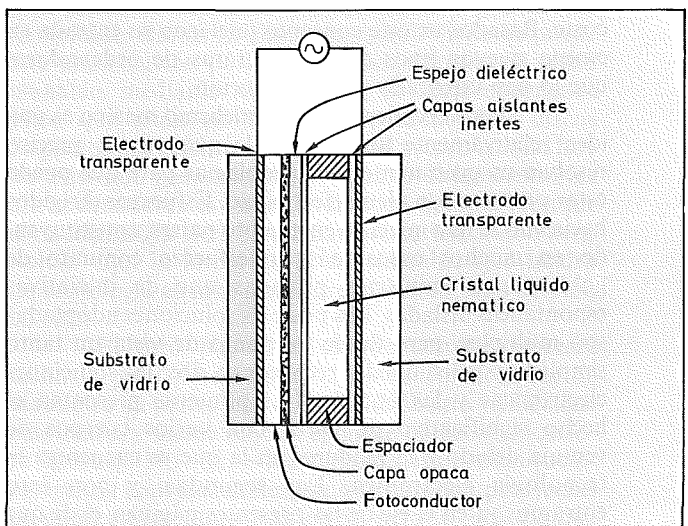


Figura 3. Elementos básicos constitutivos de una válvula de luz de cristal líquido (LCLV) o célula Hughes.

teoría de residuos. Aunque algunas de estas propuestas vuelven hoy a ser revisadas con alguna atención, no surgió ningún hecho significativo que pudiera impulsar de manera efectiva a una cierta forma real de computación óptica. Al menos en lo que a base conceptual se refiere. Pero sí aparecieron por el contrario las primeras bases y los primeros desarrollos de lo que luego ha constituido una etapa esencial de esta técnica: los *moduladores de luz espaciales* (SLM en la terminología anglosajona). El más significativo fue el modelo patentado por Hughes Research Lab. en 1975, que lleva su nombre y al que también se le conoce como Válvula de Luz de Cristal Líquido (LCLV). Su esquema de principio aparece en la figura 3 y en él ya están contenidos los conceptos que, con las correspondientes variantes, han sido empleados en muchos otros. Se trata de una simple válvula de cristal líquido que emplea como mecanismo esencial para la conversión de imágenes escritas con luz incoherente en otras aptas para ser tratadas de manera coherente, la birrefringencia óptica inducida en una capa de cristal líquido. La

base es la ya conocida de realineamiento por campo eléctrico de células torsionadas de cristal líquido nemático, y que ha sido ampliamente empleada para la construcción de displays (ver, por ejemplo, [4]).

El dispositivo convierte, en primer lugar, la distribución de la intensidad luminosa de la imagen de entrada, en una distribución espacial de pares electrón-hueco mediante un fotoconductor de sulfuro de cadmio (figura 4). Gracias a ello las zonas iluminadas se tornan en conductoras y surge consecuentemente una redistribución espacial de tensión, análoga a la portada por la luz de escritura, que se aplica sobre la capa de cristal líquido. Esta tensión, aplicada externamente a la célula, induce una birrefringencia en dicha capa que es aproximadamente proporcional a la intensidad de la luz incidente.

Un haz de luz de lectura, linealmente polarizado, atraviesa el cristal líquido, se refleja en el espejo dieléctrico, atraviesa de nuevo al cristal líquido y sale del dispositivo (recuérdese el comportamiento de las células torsionadas de cristal líquido). Un analizador, colocado en el camino de salida del haz emergente, permite el paso únicamente de la componente de luz perpendicular a la polarización inicial. Con ello, la distribución espacial de intensidad del haz de salida es, aproximadamente, proporcional a la distribución espacial de intensidad del haz de entrada. Cuando no existe luz de entrada, la intensidad de salida permanece polarizada linealmente y perpendicular al analizador, por lo que no aparece radiación final de salida.

Todo el proceso es reversible, ya que desaparece la distribución de tensión cuando el haz de entrada se anula. Se ha pasado, en consecuencia, de una imagen transportada con luz incoherente, en otra con luz

coherente que ya puede ser procesada de la forma vista en el anterior apartado. El procesado casi en tiempo real pasa a ser posible y con él un procesado más favorable.

Entre los inconvenientes que este sistema presenta se encontraban el de la lentitud de sus tiempos de respuesta, que no permitía ciclos inferiores a los 30 milisegundos y el tamaño de la célula, inferior a un cuadrado de 25 mm de lado. La definición obtenida, aunque bastante buena, se perdía cuando el objeto estaba en movimiento rápido.

A lo largo de los años transcurridos desde entonces, una gran cantidad de mejoras se han ido introduciendo en células equivalentes, en un intento de mejora sustancial de sus características. El sulfuro de cadmio fue sustituido por silicio y el cristal líquido por otras sustancias birrefringentes. Pero en todas ellas el principio básico sigue siendo el mismo. En la tabla 1 se presentan algunos de los SLM comerciales, así como sus características. Pero a pesar de las múltiples mejoras introducidas y del tiempo transcurrido desde su concepción, no se ha logrado conseguir la estructura ideal y, de hecho, es una de las partes de la computación óptica que necesitan aún mayores mejoras para que algunas arquitecturas puedan llevarse a cabo.

## Arquitecturas serie

Quizás por extensión, y como ya se ha dicho antes, la primera idea que surge al hablar de Computación Óptica es la que se deriva de un intento de llevar al terreno de la Óptica los conceptos que, tradicionalmente, han estado funcionando desde hace varias décadas en

Nombre o tipo	Compañía	Material modulador	Medio de direccionamiento	Resolución pares de línea/mm <sup>2</sup>	Sensibilidad óptica pJ/cm <sup>2</sup>	Escritura ms	Tiempo de respuesta borrado ms	Tiempo de almacenamiento
Válvula de luz de cristal líquido	Hughes	Cristal líquido nemático torsionado	Sulfuro de cadmio	30	6	10	15	15 ms
SLM microcanal	MIT Optron Hamamatsu	Cristal electroóptico (Niobato de litio)	Fotocátodo y placas de microcanales	10	$3 \times 10^{-6}$	10	20	De días a meses
Modulador óptico de lectura Pockels	Itek USC Sumitomo	Oxido de bismuto de silicio	Oxido de silicio y bismuto	6	5	<0,1	<0,1	<2hr
Priz	USSR	Oxido de bismuto de silicio	Oxido de silicio y bismuto	10	5	<0,1	<0,1	<2hr
Librascope	Hewlett-Packard Singer	Cristal líquido esméctico	Cristal líquido (por absorción de calor)	40	$10^4$	0,005	0,001	Meses
SLM Termo-plástico	Harris, NCR, CBS, ERIM Fujinon Honeywell	Plástico sensible al calor	PUK: TNF	1.400	5	10	100	Años

Tabla 1. Moduladores de luz espaciales disponibles comercialmente.



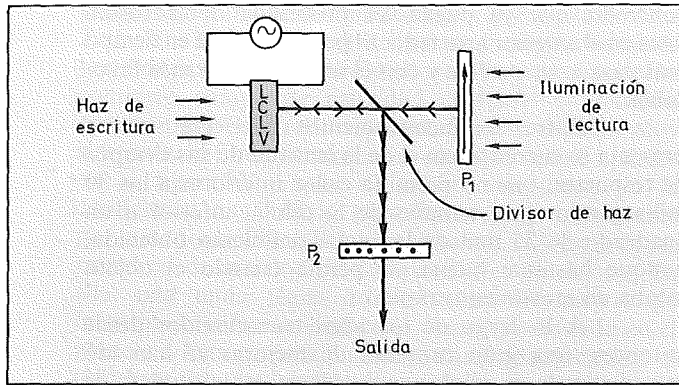


Figura 4. Principio de funcionamiento de la célula Hughes.

los ordenadores electrónicos. Esto es, un conjunto de arquitecturas basadas en operaciones lógicas, puertas, memorias con entrada y salida en serie.... En este entorno, un conjunto muy significativo de componentes básicos ha sido desarrollado en los últimos años. Algunos de ellos constituyen las piezas fundamentales para las realizaciones que se han llevado a cabo en este campo. Y aunque en un principio se pensaron arquitecturas serie, posteriormente se ha probado su utilidad en las paralelo. Otros, por el contrario, han sido de mayor utilidad en otras disciplinas que en la de partida. Es el caso, por ejemplo, de algunos de ellos cuando se han llevado al terreno de la Conmutación Fotónica. Dado que ofrecer una relación completa de todos ellos sería demasiado prolijo, nos limitaremos a mencionar únicamente los más significativos.

### Primeros desarrollos y evoluciones posteriores

La raíz de las estructuras que han ido surgiendo en los últimos años no es otra que un concepto que ya fue anunciado en estas mismas páginas hace ya más de nueve años: el de los dispositivos biestables ópticos [5]. Aunque ellos no han sido los únicos que han sido usados en el intento de construcción de ordenadores ópticos que estamos viendo aquí, sí fueron los responsables de la reactivación que, en la pasada década, ha tenido este campo.

La base de su funcionamiento, que puede verse en el artículo mencionado o en cualquier libro moderno

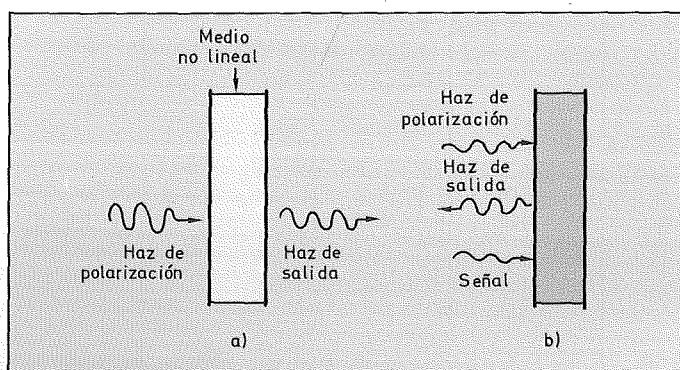


Figura 5. Resonador no lineal de Fabry-Perot.  
(a) Comportamiento sin señal de información a la entrada.  
(b) Comportamiento con señal de información.

de Óptica, no es otro que el uso de una cavidad resonante de Fabry-Perot en la que se ha introducido un material no lineal cuyo índice de refracción depende de la intensidad de la radiación contenida en su interior. Debido a ello, los estados de salida del mismo pueden, con las condiciones adecuadas, ser únicamente dos, el «on» y el «off», para todo un amplio margen de intensidades de entrada. Un esquema simplificado de su comportamiento aparece en la figura 5. Como puede apreciarse, cuando en la entrada incide únicamente un sólo haz, que denominaremos «de polarización», la salida se encuentra en el estado «off». Si a este haz se le superpone otro, que será el que constituya la «señal», el sistema pasará al estado «on», esto es, aparecerá una radiación a la salida. Dependiendo de las necesidades de cada planteamiento, esta situación puede invertirse. Este tipo de dispositivo ofrece la innegable ventaja de ser totalmente óptico, por lo que él debería ser pieza fundamental de ese «ordenador óptico» por el que algunos parece suspirar. Su designación en la literatura suele ser NLFP, «NonLinear Fabry-Perot», y puede funcionar, de acuerdo con lo dicho antes, como puerta AND, OR, NAND o XOR. Ofrece la gran ventaja de

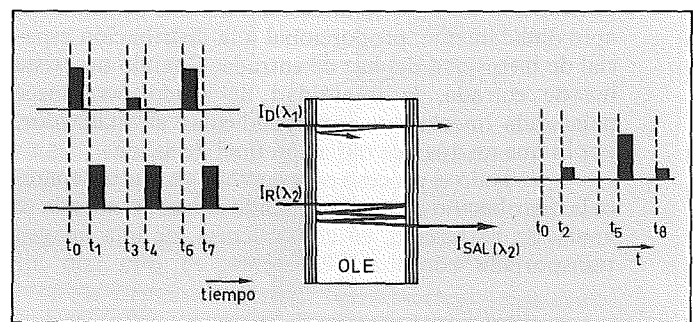


Figura 6. Funcionamiento del OLE (Interferómetro Lógico Óptico).  $I_D$  es la señal conteniendo los datos e  $I_R$  la de reloj.

poder ser integrado en grades superficies y se le han llegado a medir energías de activación del orden de  $40 \text{ fJ}/\mu\text{m}^2$  y unos tiempos de conmutación menores de 100 ps. El material empleado en este caso para constituir la cavidad no es otro que el conocido AsGa con más o menos sofisticaciones.

Una derivación del anterior, aunque trabajando con los mismos conceptos, es el conocido como OLE («Optical Logic Etalon»). Este es un tipo de dispositivo que trabaja con pulsos y para el que se requieren dos diferentes longitudes de onda, una para la polarización y otra para la señal. Su esquema y forma de trabajo aparecen en la figura 6. Como puede apreciarse, las dos entradas, la de señal y la de polarización, que podría considerarse como una señal de reloj, están separados tanto en tiempo como en longitud de onda. El dato de entrada incide sobre el OLE un instante antes que la señal de reloj. La primera se elige de manera que su  $\lambda$  se corresponda con un pico de absorción del material OLE, por lo que prácticamente toda su energía es absorbida por él. Esta absorción cambia el índice de refracción del material y con ello se alteran las características del resonador permitiendo o no el paso de la siguiente señal de reloj, de acuerdo con el diseño hecho. En el caso de la figura, la configuración adoptada es la de una puerta NOR.

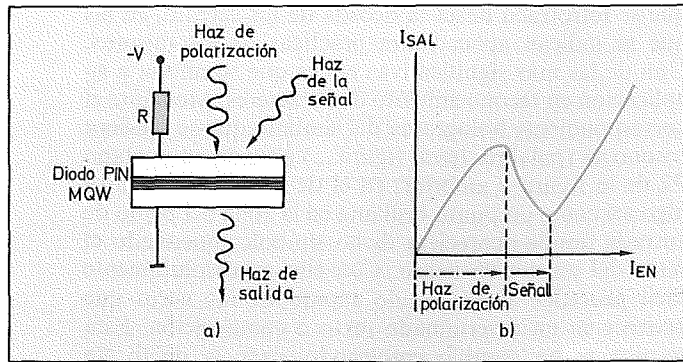


Figura 7. Esquema de un SEED (Dispositivo de Efecto AutoElectroóptico) y curva de comportamiento óptico.

El otro dispositivo básico existente es el denominado SEED («Self Electrooptic Effect Device») [6]. En este caso, el material electroóptico requiere no solamente energía óptica sino también eléctrica. Está compuesto de un diodo *p-i-n*, realizado con un pozo cuántico múltiple (MQW, por «Multiple Quantum Well») en la región intrínseca, conectado en serie con una resistencia. Su esquema aparece en la figura 7 así como su curva característica. Como en el caso del OLE, es necesario un haz de polarización al que se superpone el de la señal. La modulación de la energía de la señal de polarización por la existencia de dicha señal, da lugar a la ganancia diferencial requerida en un sistema lógico

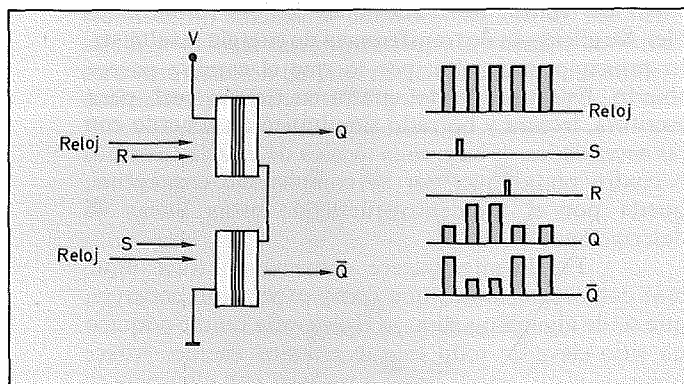


Figura 8. Comportamiento de un S-SEED.

digital. Así, cuando no hay señal de entrada, el dispositivo se comporta de forma transparente mientras que si le llega una radiación superpuesta a la de polarización, la energía combinada de ambas convierte al SEED en material absorbente y reduciendo, en consecuencia, la intensidad del haz de salida. Como puede apreciarse, este comportamiento es el característico de una puerta NOR. Estructuras como la presente se han integrado en distribuciones 2-D y es previsible que

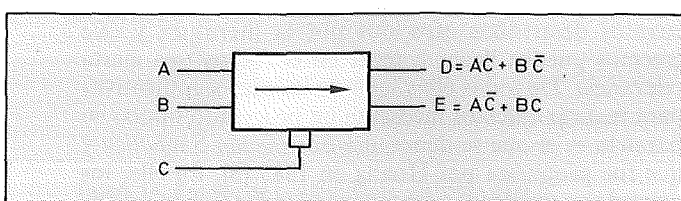


Figura 9. Conmutador óptico cinco terminales, basado en acopladores direccionales.

en los próximos años, quizás no más de cinco, puedan llegar a integrarse entre 10.000 y 100.000 SEED por centímetro cuadrado. En la actualidad, el cambio de estado se logra con energías ópticas del orden de los  $4\text{fJ}/\mu\text{m}^2$  y eléctricas de los  $16\text{fJ}/\mu\text{m}^2$ . Por lo que se refiere a los tiempos de conmutación, aunque los límites no están todavía claros, se han obtenido valores de 131 ps cuando el SEED trabaja como modulador; en otras condiciones, el tiempo obtenido ha sido de 20 ns.

Basado en la estructura anterior, es posible desarrollar una serie de configuraciones que lleguen a

Función	Conexión	Símbolo lógico	Ecuación
AND			$AC$
AND - NOT (inhibición)			$A\bar{C}$
NOT	Reloj		$\bar{C}$
BUFFER	Reloj		$C$
MUX 2Ent. 1Sal.			$AC + B\bar{C}$
MUX 2Ent. 1Sal.			$A\bar{C} + BC$
De MUX 1Ent. 2Sal.			$D = AC$ $E = A\bar{C}$
OR			$a + b$
Divisor			$a$

Figura 10. Funciones lógicas realizadas con acopladores direccionales, actuando como conmutadores ópticos y empalmes de fibras.

realizar todas las operaciones lógicas posibles. La más importante, por las razones que luego veremos al analizar el ordenador de Huang, es la denominada S-SEED cuyo esquema aparece en la figura 8. Como puede apreciarse, se trata de dos dispositivos SEED dispuestos de forma simétrica, gracias a lo cual su forma de trabajo es la de una puerta lógica NOR.

Finalmente, el último tipo de dispositivo que queremos plantear aquí, con posible uso en arquitecturas serie, es el basado en los ya conocidos acopladores direccionales de Comunicaciones Ópticas. Sus características han sido presentadas en numerosos artículos en estas mismas páginas (véase, p. ej. [7]) por lo que no volveremos a ellos aquí. Únicamente indicaremos que su base está en los ya comerciales acopladores de niobato de litio, que actúan aquí como elementos lógicos, y en líneas de retardo con fibra óptica como elementos de memoria. Su comportamiento fundamental en este caso, aparece en la figura 9. Cuando no aparece señal en el terminal C, que será la conexión eléctrica, la luz que entra por A sale por E, mientras que si existe señal en C, lo hará por D. Algo análogo ocurrirá con el otro terminal de entrada, el B. La señal que gobierna el sistema, que es la de C, puede ser, en su principio, óptica. Mediante la correspondiente transfor-

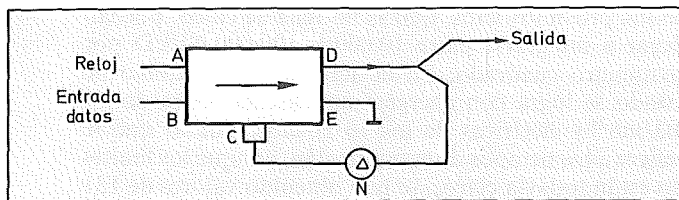


Figura 11. Memoria óptica con línea de retardo de fibra óptica.

mación en eléctrica por un fotodiodo podría entonces ser llevado al acoplador para efectuar las órdenes requeridas. Gracias a este dispositivo, todo el conjunto de elementos lógicos que aparece en la figura 11 pueden ser realizados. De igual manera, elementos básicos para cualquier ordenador, como memorias o contadores, pueden ser llevados a cabo sin demasiados problemas. Un ejemplo de memoria óptica aparece en la figura 11. En ella, los bits se almacenan mediante el empleo de un anillo de fibra óptica de longitud  $l$ , donde  $l = n l_c$ , siendo  $n$  el número de bits almacenados en el anillo y  $l_c$  la distancia recorrida por el pulso óptico en un período de reloj. A modo de ejemplo, 1024 palabras de 16 bits podrían almacenarse en un anillo de fibra de 3,3 metros de longitud con una frecuencia de reloj de 1 THz.

Hay que señalar finalmente, como resumen de todo lo anterior, que cada uno de los dispositivos presentados tiene una región muy clara de trabajo. De una forma gráfica, es lo que se representa en la figura

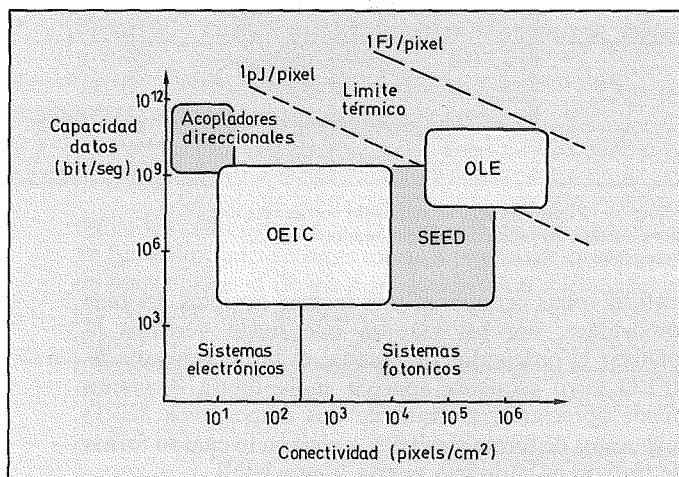


Figura 12. Entornos de aplicación de los dispositivos fotónicos para computación y conmutación fotónicas.

12. En ella que aparece la capacidad de manejo de datos, en bits/s, en función de la conectividad posible, en pixels por centímetro cuadrado, para cada tipo de componente. Gráficas equivalentes aparecen en artículos de Conmutación Fotónica, lo que demuestra la permeabilidad de estas tecnologías.

Para finalizar con el presente apartado, parece obligado introducir aquí unas últimas consideraciones sobre otro de los caminos emprendidos, casi desde el principio. Nos estamos refiriendo al de las posibles aplicaciones de la Holografía en el terreno de la Computación Óptica. La primera aplicación que se presentó como factible fue la del empleo de hologramas como filtros en el sistema de procesamiento de Fourier visto anteriormente. Existen una gran cantidad de referencias

que se retrotraen hasta la década de los setenta, en las que se indican aplicaciones prácticas de los mismos. Una de las más significativas era la que se refería a su aplicación en reconocimiento de caracteres. Mediante el correspondiente holograma del símbolo que se quisiera reconocer (palabra, letra, figura...) situado en el plano P2 de la figura 2 anterior, en el de salida se obtendrá algo así como un punto brillante en la zona del plano de entrada donde apareciera dicho símbolo, quedando el resto del mismo en negro. Con ello es absolutamente fácil proceder a un cálculo rápido de las veces que aparece en un determinado texto o composición. Esta técnica se ha seguido empleando, casi ya de forma rutinaria, y no merece la pena que nos detengamos más en ella. Quizás sólo señalar que los SLM han jugado un papel muy importante en su desarrollo.

Por otra parte, la Holografía, además de servir de base para el desarrollo de memorias en el almacenaje masivo de información, tema en el que su presencia parece asegurada durante los próximos años, juega otro papel muy importante, al menos como posibilidad tangible, en el encaminamiento de señales ópticas. La Conmutación Fotónica ya ha iniciado el proceso de incorporación de los hologramas a sus configuraciones propuestas, pero la Computación Óptica puede ser el terreno en el que realmente desempeñe el papel que se le asignó cuando fue inventada. Hace no mucho, se propuso un esquema de trabajo en el que, en el seno de un cristal fotorrefractivo, se generaba un holograma dinámico, esto es, en tiempo real, de tal forma que fuera capaz de realizar interconexiones ópticas reconfigurables. Su eficiencia de transferencia de energía resulta ser, en principio, muy alta, por lo que el camino parece abierto. Este tipo de holografía en tiempo real, para escritura, lectura y borrado simultáneo de acuerdo con las necesidades, se basa en la técnica de mezclado de dos o cuatro ondas que, por su complejidad conceptual, queda por el momento fuera de estas líneas su descripción.

Finalmente, parece conveniente traer aquí, más como comentario que como exposición concreta, que si, de alguna manera, la Holografía quiere adquirir un sitio clave en todo lo que estamos viendo, parece obligado el que pueda llegar a trabajar con eficiencia en verdadero tiempo real. Esto es, que los materiales fotosensibles con los que trabaje sean capaces de escritura y borrado sin ningún tipo de problemas. Y esto todavía está un poco lejos, a pesar de las múltiples aportaciones que se han hecho al tema.

## Arquitecturas paralelo

A fin de introducirnos ya en lo que podríamos denominar operatividad práctica de algunos de los sistemas propuestos, vamos a plantear aquí unos cuantos desarrollos ofrecidos por la literatura y que creemos pueden llegar a tener en el futuro una cierta relevancia. De todas ellas, una de las más significativas para realizar cálculos mediante un procesamiento óptico en paralelo es el que se denomina *Sustitución Simbólica* y que fue propuesta por Huang en 1983 [8]. En ella, los operadores empleados «reconocen» todas y cada una de las veces que una determinada distribución espacial de una imagen aparece, reemplazándola por otra imagen



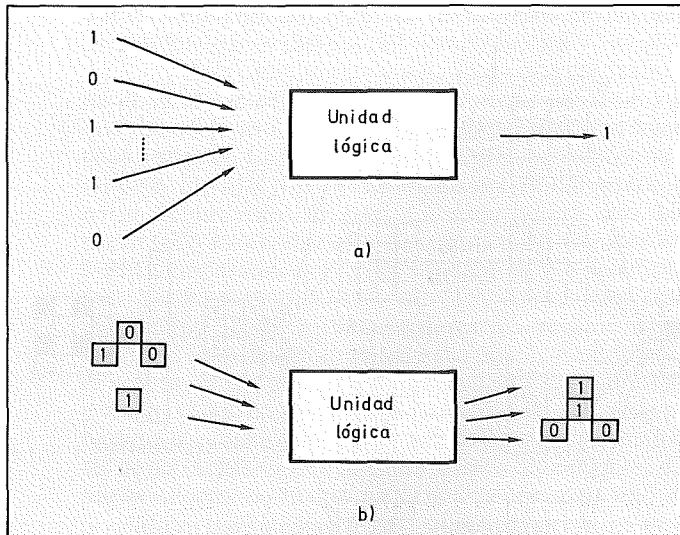


Figura 13. Comparación de la lógica de Boole con la sustitución simbólica. (a) Lógica de Boole: se reconoce un vector de estado y se substituye por un dígito. (b) Sustitución simbólica: se reconoce una configuración espacial y se substituye por otra.

prefijada. La sustitución simbólica difiere de la tradicional álgebra de Boole en que los operadores booleanos, tales como los AND o NOR, reconocen una combinación de bits dando una salida que es un único bit (figura 13a). Por el contrario, una sustitución simbólica reconoce no solamente una combinación de bits, sino también su localización relativa, y la salida, a su vez, es otra combinación de bits, posicionados de una manera determinada (figura 13b). Con ello se obtiene un mayor

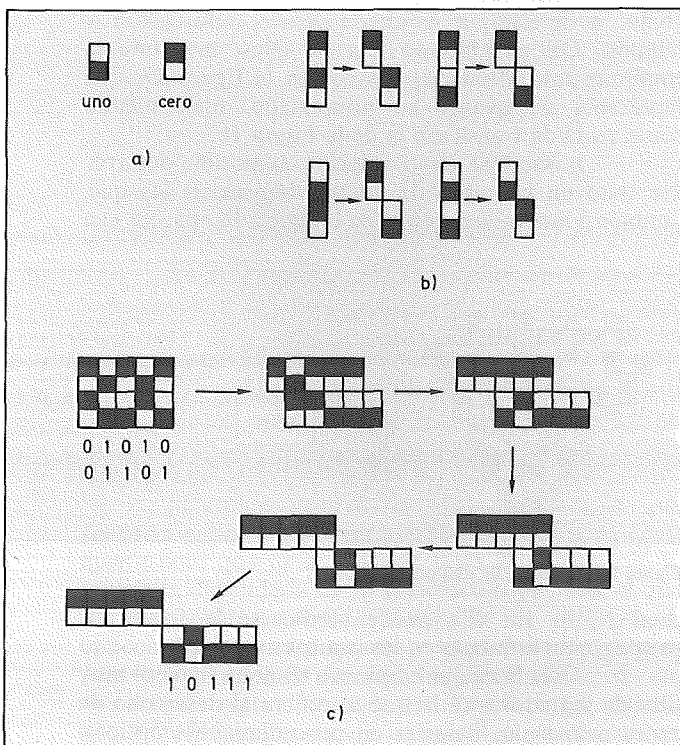


Figura 14. Empleo de la sustitución simbólica para la realización de una suma binaria de los números 1010 y 1101. (a) Representación de 1 y 0. (b) Reglas de sustitución. (c) Desarrollo de la suma.

grado de libertad y una mayor capacidad de cálculo. Este tipo de operación podría considerarse como un procesador celular óptico, en el que las operaciones son síncronas e invariantes a los desplazamientos. Mediante ella es posible realizar tanto lógica de Boole, aritmética binaria, lógica celular y máquinas de Turing simplemente mediante su uso repetido y una serie de diferentes reglas de sustitución.

Como ejemplo del uso de lo anterior en un tipo de adición binaria, tenemos la suma de los números 1010 y 1101 representada en la figura 14. En la 14a se indica la representación de unos y ceros que, como puede verse son complementarios. En la 14b se muestran las reglas de sustitución que, como puede apreciarse son, simplemente, el resultado de la suma de los números de partida representados con dos dígitos. Estas reglas se aplican reiteradamente a los números iniciales,

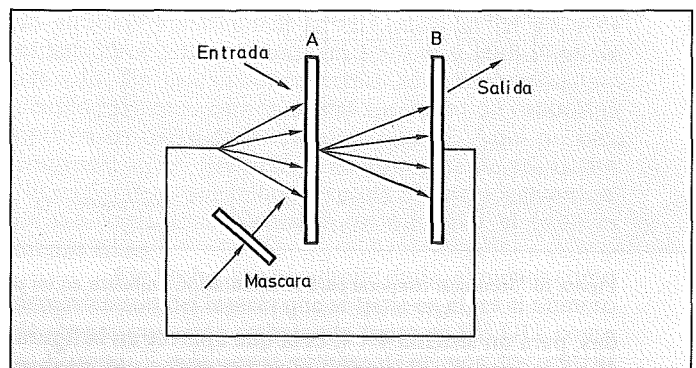


Figura 15. Esquema simplificado de un ordenador óptico digital. A y B son distribuciones bidimensionales de dispositivos ópticos no lineales y que se conectan mediante operaciones de proyección invariantes en el espacio. Las recombinaciones y los desplazamientos de imágenes necesarios, se realizan mediante divisores de haz y filtros espaciales. Una máscara diseñada de acuerdo con las necesidades de cada situación permite la programación del ordenador.

situados uno encima del otro, tantas veces como bits contengan los mismos. En nuestro caso ese número es cuatro. El resultado aparece en la figura 14c y, puede verse que el patrón resultante, el número 10111 que es la suma de los números de partida, se estabiliza antes de que todas las sustituciones se hayan realizado. No es siempre ese el caso.

Toda una serie de desarrollos han sido llevados a cabo a partir de los conceptos anteriores. Sin entrar de lleno en ninguna de las múltiples ofertas que se han presentado en la literatura, a modo de ejemplo presentaremos aquí el esquema de una propuesta de computador óptico digital realizado hace algún tiempo y que, por su simplicidad, puede ser indicativo de por donde van los pasos actuales [9]. Es el que aparece en la figura 15. Como puede apreciarse, dos distribuciones 2-D de dispositivos ópticos no lineales, como los que hemos visto en el apartado anterior (SEED y OLE esencialmente), se interconectan mediante operaciones de imágenes invariantes espacialmente. Para la realización de desplazamientos y combinaciones, se emplean divisores de haz y filtros espaciales. Una máscara constante, proyectada sobre la distribución bidimensional, proporciona la operación deseada. Una secuencia temporal de sustituciones simbólicas como las indica-

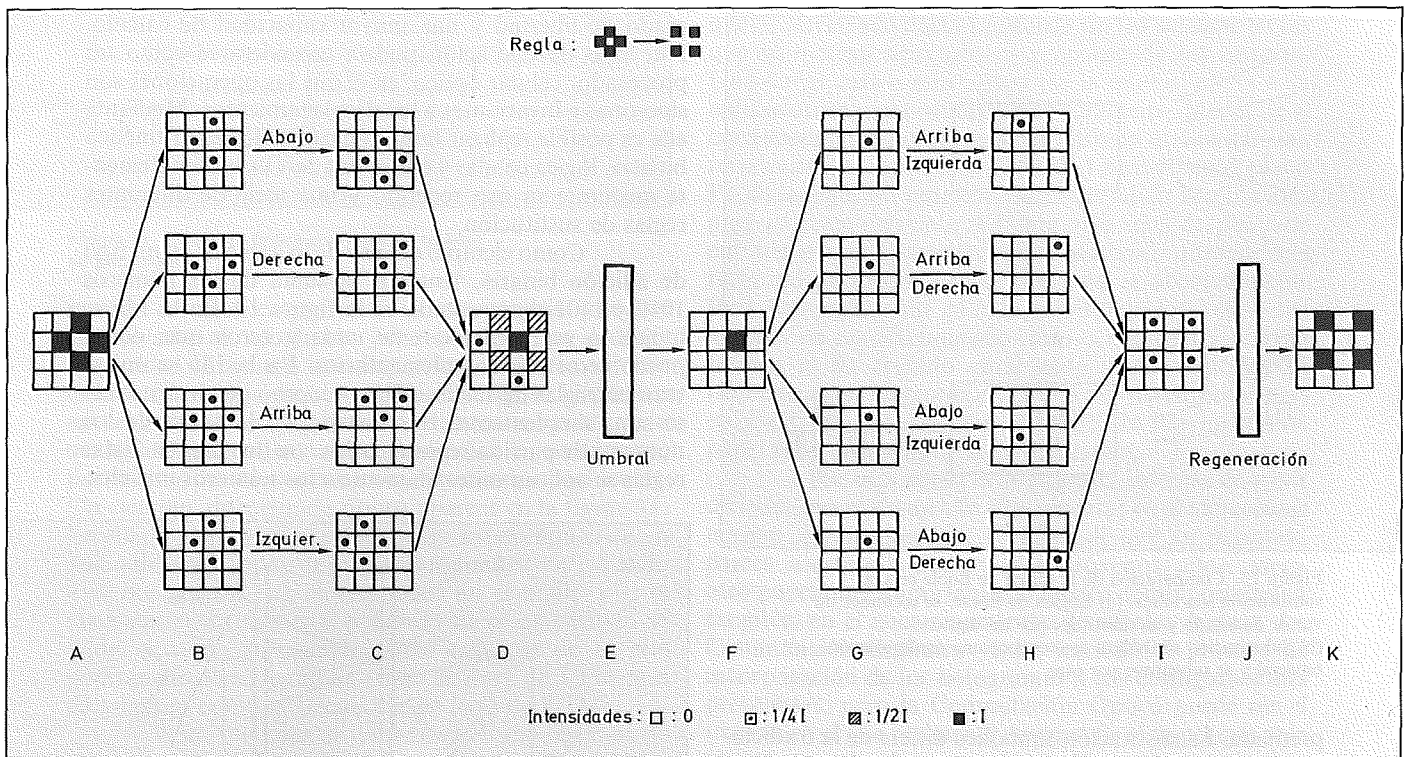


Figura 16. Secuencia temporal para la sustitución simbólica en un sistema  $4 \times 4$ .

das, para un sistema  $4 \times 4$ , es la que aparece en la figura 16. A la entrada, el sistema se presenta con una imagen que tiene cuatro puntos brillantes de intensidad I. En la etapa B, esta imagen se ha dividido en cuatro, cada una de ellas con intensidad  $I/4$ . En C, las imágenes se han desplazado en las direcciones que se corresponden con la regla que se haya tomado y que aquí aparece en la parte superior de la misma figura 16. En D, las cuatro imágenes se recombinan y, como puede apreciarse, solamente un pixel aparece con intensidad I. En E, se lleva a cabo una operación de umbral, que lo realizaría la distribución A de la figura anterior. Mediante ella, todos los pixels con intensidad inferior a I quedarían oscurecidos y solo aparecería el marcado. Esta nueva imagen se vuelve a reproducir en otras cuatro que posteriormente, se vuelven a recombinar en la etapa I. Una etapa de regeneración restaura en J los pixeles a la intensidad I con lo que resulta la imagen final.

Teniendo como base conceptual lo visto hasta aquí, la literatura ha presentado en los últimos años una amplia serie de desarrollos basados en esta filosofía. Mediante el planteamiento de determinadas reglas de transición, como la indicada en la figura 16, puede llegarse a la realización de todas las operaciones lógicas

posibles. Para ello son precisas una configuración básica de células, para cada una de dichas operaciones, y unas ciertas formas de progresar espacialmente sobre ellas. Topológicamente puede llegarse a demostrar que son sólo siete las posibles formas de avance que forman una base de elementos independientes. Son éstas: arriba, abajo, a derecha, a izquierda, cruce, bifurcación y reunión. Un ejemplo de una de ellas, mediante la configuración adecuada, aparece en la figura 17, que representa un avance en bifurcación, manteniendo como regla de transición la de la figura 16.

Basándose en lo anterior, es posible desarrollar todo un conjunto de puertas lógicas de las que, también a modo de ejemplo, en la figura 18 aparece una

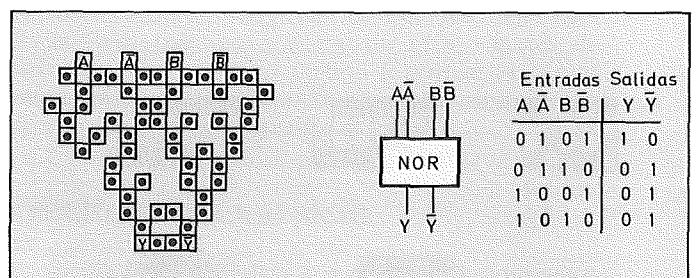


Figura 18. Esquema de una puerta NOR.

dual NOR. En ella puede verificarse la forma de propagación señalada en los puntos anteriores.

Otra línea que empieza a tener un número muy alto de seguidores es la que se refiere al desarrollo de redes neuronales basadas en procedimientos ópticos. Dada la notoria complejidad de este tipo de sistemas no parece oportuna su presentación aquí, ya que nos saldríamos, con mucho, del límite de espacio impuesto. Sólo resulta indicado decir que hay muchos que opinan

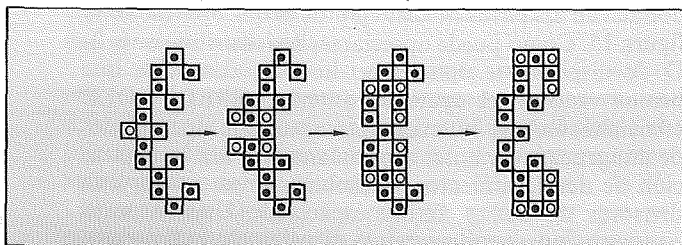


Figura 17. Secuencia temporal para una operación de bifurcación.

que el camino óptico es el único verdaderamente natural para su puesta en marcha. El tiempo lo dirá.

Para concluir este apartado, parece procedente pasar ya al comentario de lo desarrollado por Huang y que desató la avalancha de noticias periodísticas hace unas semanas. La base de su ordenador no es otra que los dispositivos S-SEED vistos en el anterior apartado y parte de lo visto en éste. La arquitectura que ha presentado está compuesta de cuatro distribuciones de S-SEED separados por lentes y máscaras que desempeñan las mismas funciones que los cables entre las puertas lógicas de los procesadores electrónicos. Una distribución de haces atraviesa cada una de estas lentes, es procesada por el correspondiente S-SEED (figura 19) y viaja hasta el siguiente S-SEED. Los cálculos se realizan mediante cambios de estado de los conmutadores de las etapas sucesivas. Cada array usa dos láseres de semiconductor de 10 mW y 850 nm, de los cuales uno es dividido su haz, mediante una red de difracción, en una distribución de nuevos haces y combinados posteriormente con el haz que suministra la información en el S-SEED. Éste es capaz de conmutar con 1 pJ de energía luminosa que incida sobre él. El tamaño en superficie de todo el sistema es de alrededor de 1 metro cuadrado.

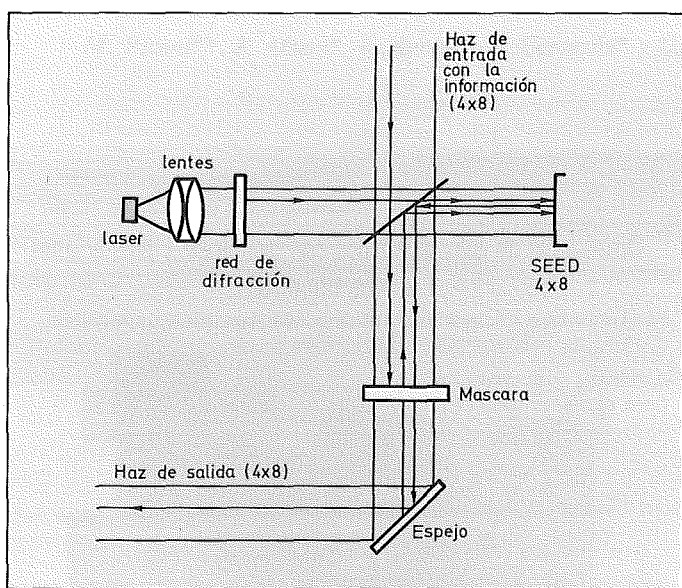


Figura 19. Esquema parcial de una etapa del procesador óptico desarrollado por Huang.

Huang afirma que todo ello podría integrarse en un sustrato de cuarzo de 2 x 3 pulgadas, mediante óptica integrada.

Después de todo lo visto, y antes de que pasemos a las conclusiones, podría preguntarse cualquiera aquí que para qué vale todo lo anterior. Y la respuesta dependería de lo convencido que esté el que responda sobre la realidad futura de los ordenadores ópticos. La primera respuesta más inmediata sería que para la realización de ordenadores universales mediante una sencilla regla de transición. Pero de igual manera que Von Neumann nunca completó el diseño de un sistema que se reproducía a sí mismo, la aplicación aquí de lo anterior puede también ser dudosa. Otra respuesta más próxima a la realidad puede ser, simplemente, para la realización de operaciones de suma como la indicada

anteriormente. Pero, una vez más, la nueva pregunta que surge es si eso no lo hace mucho más fácil cualquier ordenador convencional. Como no es recomendable que sigamos aquí generando de forma indefinida preguntas y respuestas, casi en la forma autorreproductora de Von Neumann, dejamos la respuesta final en manos del lector.

## A modo de conclusiones

Parece que es todavía un poco pronto para que se pueda hablar, con una cierta garantía de la verdad o de la duda de una posible computación óptica futura. En este artículo nos hemos centrado en aquellas partes de la misma que con mayor propiedad pueden recibir el nombre de componentes o arquitecturas para ordenadores ópticos. No hemos hablado prácticamente nada de aquellas aplicaciones de la Óptica a los actuales ordenadores y en las que casi todo el mundo está de acuerdo. En este último terreno, sólo es cuestión de tiempo para que veamos ordenadores usando conceptos ópticos en parte de su funcionamiento. Aquí no hay controversia y, tarde o temprano, será un hecho rutinario. Pero por lo que respecta al otro segmento, el de los verdaderos «ordenadores ópticos», el tema es menos claro.

Un hecho que no admite duda, al menos como demostración del interés que se tiene en él, es el número de grupos que están trabajando tanto en EE.UU. como en Europa. Y más que el número de grupos, los centros en los que se ubican. De una manera muy rápida, y sin ser exhaustivos, podemos señalar: Georgia Tech, Caltech, UAH (Univ. Alabama), Heriot-Watt, Erlangen Univ., Naval Res. Lab., Hughes Res. Lab., Penn State Univ., Washington, Univ. Colorado, Colorado State Univ., Stanford, AT & T Bell, IBM, etc., aparte de un número muy elevado de otras industrias más o menos grandes. A pesar de todo ello, las cosas aún no están muy claras. En una especie de rápido resumen, podríamos mencionar aquí una serie de pros y contras que sintetizarían la situación actual.

Algunos de estos pros y muchos de estos contras se basan en las opiniones de verdaderos expertos en el área. Son éstas:

— La idea de que pueden trabajar a la velocidad de la luz es falso. Se ha demostrado que muy difícilmente podrán rebajar el límite de unos pocos picosegundos por operación. (H.J. Caulfield)

— Mucho de lo que hace la Óptica de Fourier lo hace la Electrónica, y más barato. (H.J. Caulfield)

— El futuro de la Óptica sólo está seguro en la realización de un elevado número de interconexiones. Para que no tuviera competencia habría que llegar a la utilización efectiva de la 3-D. (H.J. Caulfield) (J.W. Goodman)

— Haría falta unir las técnicas de pulsos ultracortos (pico y femtosegundos) con las de la computación óptica, hecho que aún no se ha iniciado. (J.W. Goodman)

— Hasta que no se pueda suministrar un componente óptico encapsulado, que sea capaz de realizar alguna operación, no se iniciará el despegue. (J.A. Neff)

— Sólo cuando aparezcan necesidades comer-

ciales fuertes se podrá hablar de su aparición en el campo real. Si en la década de los 90 no aparece un producto en el mercado, será muy difícil que la Computación Óptica siga viviendo. (R.D. Guenther) (J.A. Neff)

— No será posible la introducción de un ordenador óptico en la vida cotidiana hasta que no sea como dos órdenes de magnitud superior a otro electrónico. Hay que pensar que no hay apenas técnicos ni graduados en estas tecnologías y que sería preciso cambiar parte de la actual industria electrónica (W.T. Rhodes).

— Los ordenadores ópticos tendrían que ser entre diez y cien veces mejores que los electrónicos para justificar su aparición. (B. Soffer)

— El primer ordenador óptico de tipo comercial aparecerá entre el año 2000 y el infinito, y puede que esté más próximo al segundo límite que al primero. (J.W. Goodman)

La lista de opiniones podría continuar durante un largo trecho. Pero no creemos que merezca la pena. La Historia, como decíamos al iniciar este artículo, enseña muchas cosas y una de ellas es que cualquier desarrollo no previsto, en el momento más impensado, puede dar al traste con las opiniones más asentadas. A modo de recordatorio, se podrían hacer aflorar opiniones equivalentes, de hace como ocho años, relativas al futuro de la superconductividad. En aquel momento se decía que iba a ser un camino muy difícil, casi imposible, el que debería seguir si se pretendían tener aplicaciones reales. Al poco tiempo, el descubrimiento de los superconductores a altas temperaturas echó por tierra todas esas opiniones. Aquí, a lo mejor, puede pasar igual. O quizás no.

En cualquier caso, y como he dicho en otros lugares, no podemos sentarnos y esperar a ver qué pasa, porque como decía Lawrence Ferlinghetti «Don't wait for the Revolution/or it'll happen without you» [10].

- [8] A. Huang, «Parallel Algorithms for Optical Digital Computers», en Technical Digest, IEEE Tenth International Optical Computing Conference, 13-17 (1983).
- [9] M.J. Murodca, «Digital optical computing with one-rule cellular automata», Applied Optics, 26, 682-687 (1987).
- [10] L. Ferlinghetti, «Endless Life: Selected Poems», New Directions Book, N.Y. (1981).

---

**José Antonio Martín Pereda.** Catedrático del Departamento de Tecnología Fotónica de la UPM. Sus actividades se han centrado desde 1975 en el estudio y desarrollo de sistemas y componentes para comunicaciones ópticas y procesamiento fotónico de la información. Es miembro de los comités técnicos de varias conferencias internacionales de dichas áreas y ha publicado numerosos artículos científicos y de política científica en revistas nacionales e internacionales.

**Ana González Marcos.** Finalizó los estudios de Ingeniería Superior de Telecomunicación en 1986, en la UPM. Sus primeros trabajos se centraron en el estudio de los láseres vibrónicos de estado sólido, para su aplicación en sistemas de medida a base de materiales especiales, especialmente LIDAR. En la actualidad lleva a cabo una serie de estudios en torno al desarrollo de ciertas fases de los ordenadores ópticos y su posible empleo en procesamiento de información.

## Bibliografía

- [1] J.A. Martín-Pereda, «Fotónica. Algunas consideraciones sobre su desarrollo», Mundo Electrónico, 200, 161-173 (1989).
- [2] P.W. Smith, «On the physical limits of digital optical switching and logic elements», Bell Syst. Tech. J., 61, 1975-1993 (1982).
- [3] Susan Sontag, «On Photography», Penguin, London (1987).
- [4] J.A. Martín-Pereda, M.A. Muriel & J.M. Otón, «Cristales Líquidos I: bases físicas de su comportamiento», Mundo Electrónico, 140, 75-91 (1984). «Cristales Líquidos II: dispositivos electroópticos de representación», Mundo Electrónico, 141, 63-72 (1984). «Cristales Líquidos III: Nuevas aplicaciones», Mundo Electrónico, 142, 59-70 (1984).
- [5] J.A. Martín-Pereda, M.A. Muriel & J.M. Otón, «Biestabilidad Óptica: un nuevo camino para el láser», Mundo Electrónico, 110, 139, (1981).
- [6] D.A. Miller et al., «The quantum well self-electrooptic effect device: Optoelectronic biestability and oscillation, and self-linearized modulation», IEEE J. Quantum Electron., 21, 1462-1476, (1985).
- [7] J.A. Martín-Pereda, «Comunicaciones Ópticas: Situación y perspectivas», Mundo Electrónico, 195, 63-72 (1989).